

Laser-1550 nm à Fibra em *Mode-Locking* Harmônico Passivo na Cavidade de Figura-de-8

Laila J. S. Souto, Filipe L. T. da Silva, Cláudia B. Marcondes e Ricardo M. Ribeiro

Resumo— Este artigo descreve um dispositivo laser à fibra óptica em configuração de anéis em figura-de-oito (F8L) utilizando um amplificador óptico semiconductor (SOA) rápido como meio de ganho. Obteve-se *mode-locking* então gerando pulsos de curta duração na frequência fundamental e até 625 MHz (50º harmônico) com a mesma cavidade. Pulsos retangulares de 10 ns de duração e período de 26 ns também foram obtidos. Os diferentes sinais de saída foram observados em função da corrente aplicada ao SOA e ao ajuste manual dos controladores de polarização, e nunca foram antes reportados para uma mesma configuração F8L com um SOA rápido.

Palavras-Chave— Amplificador óptico semiconductor; comunicações ópticas; dispositivos ópticos; laser; *mode-locking* harmônico.

Abstract— This article describes the assembly and characterization of a fiber optic laser device in a figure-of-eight (F8L) ring configuration using a semiconductor optical amplifier (SOA) as medium of gain. The assembled F8L device consists of a laser operating in the harmonic mode-locking. Longitudinal modes locking were obtained with a repetition rate of short duration pulses at the fundamental frequency and up to the 50th harmonic with the same cavity. Different output patterns were observed depending on the current applied to the SOA and the adjustment of the polarization controllers.

Keywords— Semiconductor optical amplifier; optical communications; optical devices; laser; harmonic mode-locking.

I. INTRODUÇÃO

Os lasers à fibra óptica permitem obter confinamento do sinal óptico ao longo da fibra de uma forma eficiente. Com isso, torna-se possível a construção de lasers (à fibra) em uma cavidade longa de forma relativamente simples. Propriedades de propagação como dispersão cromática, birrefringência e não-linearidades ópticas naturalmente impactam a operação dos lasers à fibra pelo fato da luz ficar confinada em seu núcleo. As principais desvantagens do confinamento óptico em cavidades longas são: instabilidade espectral e temporal de emissão devido a fatores externos [1]. Entretanto, as características de propagação mencionadas podem por um outro lado serem vantajosamente exploradas, como por exemplo na geração de pulsos solitônicos [2] ou de pulsos de nanossegundos [3].

Uma importante vertente no desenvolvimento de lasers à fibra óptica, é na geração de pulsos curtos ou ultracurtos cobrindo uma larga faixa que vai de dezenas de nanossegundos passando por picossegundos e chegando até dezenas de femtossegundos [4,5]. Têm-se também obtido taxas de repetição de pulsos de laser que vão de kHz [4] até multi-GHz através de processos de *mode-locking* ou *Q-switching* [6]. Lasers à fibra encontram diversas aplicações nas comunicações ópticas: geração de sólitons, amostragem totalmente óptica devido aos pulsos de baixo *jitter* que podem ser obtidos, geração ultra-estável de tributários de altas taxas

(exemplo: OC-192/STM-64/10G SONET) e regeneração digital 3R [7,8]. Outras aplicações de pulsos ultracurtos também têm sido reportadas como a sua utilização na caracterização de fenômenos rápidos em dispositivos ópticos ou optoeletrônicos [9], compostos químicos e estruturas biológicas.

O F8L descrito em [10] reporta o uso de um amplificador à fibra dopada com Er^+ combinado com um SOA, este último com 20 dB de ganho e 30 ns de tempo de subida máximo. Obtiveram *mode-locking* em 210 MHz ($T = 4,8$ ns), ou o 28º HML em torno de 1550 nm.

No artigo [6], é descrito um F8L usando um SOA como meio de ganho, porém centrado em 1,06 μm . Foi observado *mode-locking* passivo na faixa de 30 MHz – 12,02 GHz, correspondente até o 1202º HML. A sintonização em frequência de repetição foi obtida variando o I_{bias} na faixa 80-660 mA. A operação deste F8L [6] foi no regime de dispersão normal (para 1,06 μm) onde o mecanismo de formação dos pulsos é completamente diferente dos gerados por F8Ls operando no regime anômalo (sólitons convencionais). Foi mostrado [6] que apenas 46 mW de potência óptica dentro da cavidade era suficiente para o dispositivo gerar taxas em multi-GHz com 10 MHz de frequência fundamental.

O artigo [2] mostra 3 regimes distintos (1550 nm) usando NOLM (*Nonlinear Optical Loop Mirror*) como chave passiva para compor um absorvedor saturável artificial e fibra dopada com Er^+ como meio de ganho. O 1º regime foi solitônico onde um pente irregularmente periódico de pulsos curtos com espectro típico (de sólitons) foi observado. O 2º regime observado, foi o de sólitons cooperativos resultando na saída de pulsos de quase 1 ms de duração na frequência fundamental. Finalmente, o 3º regime observado foi de pulsos retangulares de poucos nanossegundos (< 10 ns) de duração.

No artigo [3], foi observado que um F8L podia gerar um trem de pulsos retangulares com duração na faixa 46-66 ns, porém usando fibra dopada com Er^+ como meio de ganho. Tais pulsos retangulares ficam mais largos à medida que se aumenta a potência óptica de bombeio da fibra com Er^+ , mas a amplitude dos pulsos se mantém travada num valor máximo [3]. O mecanismo de geração de tais pulsos retangulares, foi identificado como sendo o de *Dissipative Soliton Resonance* (DSR).

O artigo [4] mostra também a geração de pulsos quadrados chaveados com NOLM usando um F8L operando com base no mecanismo de DSR. Trata-se de uma forma de gerar pulsos com alta energia em baixas taxas de repetição com base no DSR que funciona no regime de dispersão normal, mas que também pode ser observado no regime anômalo [4]. Neste trabalho [4] de 2018, foi reportado a obtenção de uma taxa em 201,5 kHz de pulsos quadrados com duração na faixa 30 ns – 190 ns.

Fazendo uso de componentes e fibras mantenedoras de polarização (PM), D. Chaparro e colegas conseguiram uma melhor estabilidade maior [5]. O artigo [5] mostra então uma montagem F8L com um SOA dicroico (18 dB de contraste) todo montado com componentes de fibra PM onde não são usados controladores de polarização. Foi observado *mode-locking* passivo do fundamental em 18 MHz até o 136° HML em 2,45 GHz, onde os pulsos possuíam duração de poucas centenas de femtossegundos.

Os amplificadores ópticos semicondutores (SOAs) disponíveis no mercado apresentam uma rápida recuperação do ganho de amplificação que tipicamente pode ir de ~1 ns até 25 ps, permitindo a sua aplicação em diversos circuitos ópticos para o processamento fotônico de sinais [11]. Quando inseridos na montagem dos lasers à fibra óptica, os SOAs podem desempenhar simultaneamente o papel de meio de ganho óptico e de modulador.

O presente artigo, foi originalmente motivado pela necessidade de realizar amostragem totalmente óptica [8], e desta forma dispor em Laboratório de um dispositivo capaz de gerar pulsos ópticos na faixa de 1550 nm, de duração típica de picossegundos e taxas em multi-GHz com baixo *jitter*. A escolha foi pela configuração F8L de um laser à fibra, porém utilizando um SOA rápido (25 ps de recuperação do ganho) como meio de ganho, não antes reportado na literatura. Devido às limitações de recursos, não foi possível explorar a banda de modulação oferecida pelo SOA. Porém, conforme ficará claro adiante, a principal contribuição deste trabalho foi a de mostrar experimentalmente que diversos formatos de onda de saída podem ser obtidos do mesmo F8L com um SOA rápido.

Na secção II está descrita a montagem experimental do F8L, na III os resultados experimentais obtidos e discussões pertinentes e na secção IV as conclusões do artigo.

II. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Na Figura 1 é apresentado esquematicamente um laser em figura-de-oito (F8L). É constituído por um interferômetro de Sagnac à fibra com SOA (Kamelian, 1550 nm-Nonlinear SOA com 10 dB de ganho e 25 ps de recuperação do ganho), formando então um NALM (*Nonlinear Amplified Loop Mirror*). O NALM é conectado através de um acoplador 2x2 a um anel de ressonância unidirecional (UR), devido à inserção de um isolador óptico. O UR se comporta como o ressonador principal e contém um isolador óptico que força um sentido de oscilação. Aplicando uma corrente I_{bias} ao SOA igual ou superior ao valor limiar (~ 70 mA), através de um ajuste empírico dos controladores de polarização, foi possível obter uma transmissão máxima de pulsos *mode-locking* ou seja, o F8L podia operar no regime de *mode-locking* passivo.

Deve-se notar que o SOA opera como meio de ganho e simultaneamente constitui o NALM que funciona como um absorvedor saturável artificial [10]. Isto ocorre porque o NALM funciona como uma chave, rejeitando baixas intensidades que acabam sendo bloqueadas pelo isolador, enquanto transmite as mais altas intensidades dos pulsos ópticos que ressoam no UR. Um filtro óptico passa-banda ajustável manualmente está também contido no UR, permitindo realizar a sintonização na faixa 1520-1565nm. Entretanto, este artigo só mostrou resultados experimentais em 1550 nm. Tanto as fibras ópticas monomodo quanto os componentes utilizados, foram *standard*

de forma que o F8L operava no regime de dispersão anômala em 1550 nm.

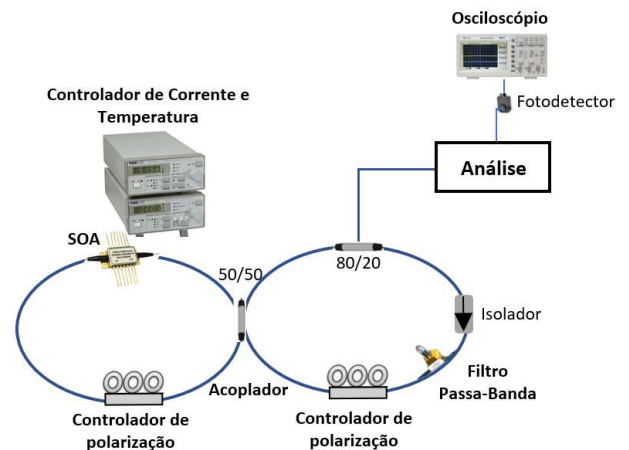


Fig. 1. Esquema experimental do laser à fibra óptica em uma cavidade em figura-de-oito (F8L) com um SOA como meio de ganho em regime de modo travado passivo.

De acordo com a Figura 1, é possível observar que o dispositivo é baseado em um par de anéis de fibra óptica em conjunto com controladores de polarização, sendo utilizado um SOA como meio de ganho, ou seja, não há qualquer entrada de sinais elétricos ou ópticos em alta frequência, mas somente sinais de saída.

O anel NALM tem a função de realizar o chaveamento, a amplificação e a estabilização dos pulsos, que ocorre da diferença de fase não-linear entre os modos longitudinais da luz ao se propagar ao longo do anel. Logo, ocorre o travamento de modos [12], ou seja, quando entra em sincronia o chaveamento da luz no NALM, no sentido determinado pelo isolador, com o tempo de trânsito óptico no circuito formado pelos dois anéis.

A função do UR tem como objetivo o estreitamento do espectro pelas múltiplas passagens pelo filtro. O acoplador retira uma fração da luz da cavidade e injeta no outro anel. Uma parte da luz da cavidade é extraída por um acoplador 80/20, ou seja, 80% da luz permanece no anel e os outros 20% são retirados para análise do sinal. As análises foram realizadas através de um osciloscópio digital. Antes, porém, a luz, incide em um fotodetector de InGaAs modelo DET01CFC da Thorlabs, sem amplificação, com banda de 1,2 GHz.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de calcular o espaçamento teórico em frequências entre os modos longitudinais gerados no F8L, foi utilizada a Equação (1).

$$\Delta f = \frac{c}{n_{fibra} \cdot L_{perimetro}} \quad (1)$$

Sendo a velocidade da luz no vácuo $c = 3 \times 10^8$ m/s, $n_{fibra} = 1,46$ o índice de refração efetivo da luz ao se propagar ao longo da fibra e $L_{perimetro} \sim 17$ m o perímetro físico total dos dois anéis de fibra, obteve-se então $\Delta f \sim 12,1$ MHz.

Os traços de osciloscópio da saída do F8L em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 180$ mA, 280 mA e 380 mA estão mostrados nas Figuras 2 a 4, respectivamente.

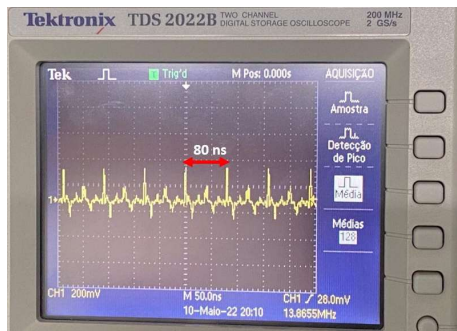


Fig. 2. Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 180$ mA.

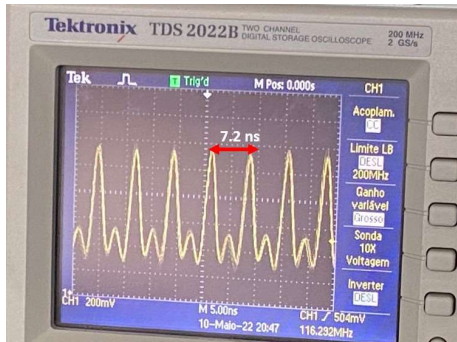


Fig. 3. Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 280$ mA.

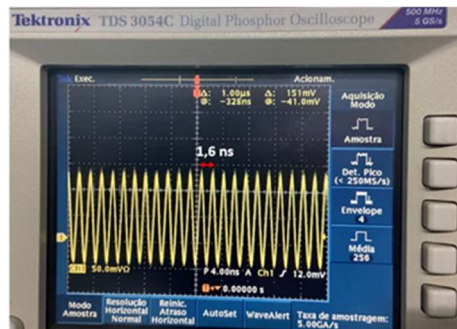


Fig. 4. Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 380$ mA.

A Fig. 2 mostra que para $I_{bias} = 180$ mA foi possível detectar três comportamentos temporais distintos. Primeiramente, observa-se um trem de pulsos mais intensos onde a condição de *mode-locking* com período de 80 ns entre os pulsos é medida. O valor de $T = 80$ ns corresponde à frequência de oscilação longitudinal fundamental de 12,5 MHz, em boa concordância com o cálculo teórico em 12,1 MHz. Em segundo lugar, pode-se notar pulsos menos intensos surgindo exatamente entre dois pulsos mais intensos consecutivos.

Os pulsos menos intensos correspondem ao surgimento de um 2º harmônico (2º HML) com $T = 40$ ns. Na realidade, os pulsos mais intensos são compostos da superposição de um pulso fundamental com o seu 2º harmônico. A Fig. 2 mostra também a ocorrência de “pulsos negativos”, temporalmente aparecendo logo à direita de cada um dos pulsos no fundamental. Este resultado sugere a ocorrência de sólitons “brilhantes” correspondendo aos pulsos “positivos” no fundamental, enquanto que os pulsos “negativos” correspondem aos sólitons “escuros”. Esta possibilidade está de acordo com a literatura,

onde é mostrado tal ocorrência utilizando F8L no regime anômalo [13].

A Fig. 3 mostra que para $I_{bias} = 280$ mA foi possível detectar a condição de *mode-locking* com período de 7,2 ns entre os pulsos, valor este correspondente à frequência de oscilação harmônica de 138,8 MHz, ou o 11º harmônico *mode-locking* (HML). A Fig. 3 mostra também pulsos com ~ 2 ns de duração, valor este severamente limitado pela banda em 200 MHz do osciloscópio utilizado. Pode-se também notar a formação do 22º HML de forma similar ao relatado no parágrafo anterior, relacionado à Fig. 2.

A Fig. 4 mostra que para $I_{bias} = 380$ mA foi possível detectar a condição de *mode-locking* com período de 1,6 ns entre os pulsos, valor este correspondente à frequência de oscilação harmônica de 625 MHz, ou o 50º HML. A Fig. 4 mostra também pulsos com ~ 1 ns de duração, valor este também severamente limitado pela banda de 500 MHz do osciloscópio. Se a Fig. 2(a) de [10] for examinada, pode-se observar que os autores obtiveram em osciloscópio pulsos *mode-locking* que se parecem com um tom senoidal com 4,8 ns de período e largura temporal de 2,28 ns. Isto corrobora a interpretação dada para o gráfico da Fig. 4, mas os autores [10] não mostraram o espectro elétrico.

Entretanto, em experimentos realizados após a submissão deste artigo, obteve-se alguns resultados aparentemente discrepantes. Para altos valores de corrente ($I_{bias} > 300$ mA) e ajustando empiricamente os controladores de polarização, obteve-se saída sob a forma de tons senoidais “puros” em 352 MHz e após um reajuste, um outro tom em 578 MHz foi obtido.

A confirmação foi primeiramente realizada visualmente, na tela do osciloscópio. Simultaneamente, o sinal foi observado em um analisador de espectro elétrico (ESA) nas resoluções (RBW) de 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz e 10 MHz. Para todos os valores de RBW apenas um pico foi detectado, em 352 MHz (e depois em 578 MHz). Isto nos levou a concluir sobre a possibilidade de termos uma saída no formato de um tom senoidal ao invés de pulsos. No entanto, é possível que frequências mais altas que 352 MHz (ou 578 MHz) estejam sendo atenuadas pelo dispositivo.

A Fig. 5 mostra que para $I_{bias} > 350$ mA foi possível detectar pulsos ópticos retangulares na taxa de 38,5 MHz ($T = 26$ ns), correspondente ao 3º HML, e com largura temporal à meia-altura de ~ 10 ns, ainda dentro da banda do osciloscópio utilizado. Com base em [3] e [4], é possível que o mecanismo por trás da geração dos pulsos retangulares da Fig. 5 seja o DSR, porém acontecendo em um F8L no regime anômalo [4].

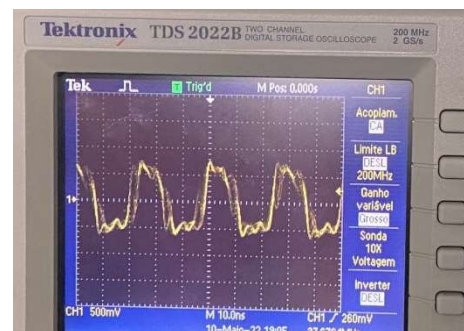


Fig. 5. Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo na forma de pulsos retangulares para $I_{bias} > 350$ mA.

Observou-se pulsos estáveis numa escala temporal tipicamente < 1 minuto ou ao menos vários minutos para $I_{\text{bias}} > 300$ mA, porém muita sensibilidade para com o ajuste dos controladores de polarização.

IV. CONCLUSÕES

Este artigo mostrou o desenvolvimento de lasers à fibra em anéis na configuração de figura-de-oito (F8L) no regime de dispersão anômala em 1550 nm, em *mode-locking* passivo. Pôde-se concluir sobre a possibilidade de se obter sintonização HML (não-linear) no F8L ao ser aumentada a corrente de polarização do SOA, devido às propriedades ópticas não-lineares destes últimos. Além dos HMLs até a 50ª ordem, também foi observado uma possível ocorrência de sólitons “escuros” assim como a geração de pulsos retangulares. Estes últimos são mais propensos a surgirem sob o regime de dispersão normal. Pôde-se também concluir sobre a variedade e complexidade de sinais que podem ser gerados com simples ajustes de I_{bias} e de estado de polarização na cavidade.

Deve-se ressaltar que no F8L aqui descrito, foi utilizado como meio de ganho um SOA ultra-rápido (25 ps) limitado em $I_{\text{bias}} = 400$ mA e de ganho relativamente menor (10 dB) que outros SOAs comumente encontrados no mercado. Adicionalmente, o SOA compôs o NALM que fez o papel de absorvedor saturável. Não foi encontrado na literatura qualquer registro de F8Ls utilizando como meio de ganho um SOA com as características do aqui utilizado. Pôde-se finalmente concluir, ao menos de forma preliminar, que o tipo de SOA utilizado pode ter causado os variados tipos de pulsos na saída do F8L.

Uma continuação natural deste trabalho é aprofundar a caracterização do F8L com medidas de potência óptica na cavidade, espectros óptico e elétrico de saída. Um modelo teórico e simulações numéricas também são aqui necessárias para a continuação desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer aos colegas do Laboratório de Comunicações Ópticas (LaCOp) da Universidade Federal Fluminense (UFF).

REFERÊNCIAS

- [1] Digonnet, Michel JF. *Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers*, revised and expanded. CRC press, 2001.
- [2] S. S. Aleshkina, M. M. Bubnov and M. E. Likhachev, “Nanosecond pulse generation near 1.55 micron in the all-fiber figure-eight mode-lock laser with passive nonlinear loop mirror.”, 4th PHOTOPTICS, Rome, Italy, February 27-29 (2016).
- [3] Shi-Ke Wang *et al*, “Dissipative soliton resonance in a passively mode-locked figure-eight fiber laser”, *Optics Express*, 21, 2, pp. 2402-2407 (2013).
- [4] Z. Li, D. Jia, X. Sun and Y. Jin, “Generation of square pulse in an all-fiber Yb-doped figure-of-eight fiber laser”, 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), 2018.
- [5] D. Chaparro, L. Furfaro and S. Balle, “Subpicosecond pulses in a self-starting mode-locked semiconductor-based figure-of-eight fiber laser”, *Photon. Res.* 5,1, pp. 37-40 (2017).
- [6] Hou-Ren Chen *et al*, “12 GHz passive harmonic mode-locking in 1.06 mm semiconductor optical amplifier-based fiber laser with figure-eight cavity configuration”, *Optics Letters*, 38, 6, pp. 845-847 (2013).
- [7] WADA, Osamu. *Femtosecond all-optical devices for ultrafast communication and signal processing*. New Journal of Physics, v. 6, n. 1, p. 183, 2004.

[8] Ribeiro, Ricardo M., Frédéric Lucarz, and Bruno Fracasso. "An all-optical sampler for digitising radio-over-fibre transceivers." Proceedings of the 2013 18th European Conference on Network and Optical Communications 2013 8th Conference on Optical Cabling and Infrastructure (NOC-OCI). IEEE, 2013.

[9] J. M. Dudley *et al*, “Complete characterization of ultrashort pulse sources at 1550 nm”, *IEEE J. of Quantum Electronics*, 35, 4, pp. 441-450 (1999).

[10] S.-Sik Min, Y. Khao and S. Fleming, “Passively modelocked self-starting figure-eight fiber laser with semiconductor optical amplifier, OECC/ACOFT, Sydney, Australia, 07-10 July (2008).

[11] Said, Youssef, and Houria Rezig. "All-Optical Signal Processing by Using SOA Nonlinearities: Prospects for the Evolution of Next Generation of Optical Networks." Recent Patents on Signal Processing (Discontinued) 2.1 (2012): 76-81.

[12] Sharma, Utkarsh, and Xing Wei. "Fiber optic interferometric devices." Fiber Optic Sensing and Imaging. Springer, New York, NY, 2013. 29-53.

[13] Qiu-Yi *et al*, “Pulse pair in a figure-eight dispersion-managed passively modelocked fiber laser”, *IEEE Photonics Journal*, 4, 5, pp. 1646-1652 (2012).